

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ
СДВ СИГНАЛА, СВЯЗАННЫХ С ИСКУССТВЕННЫМИ
ВОЗМУЩЕНИЯМИ ИОНОСФЕРЫ, СОЗДАВАЕМЫМИ
НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ СУРА

Рапопорт Виктор Овсеевич
Поляков Сергей Владимирович
Шлюгаев Юрий Владимирович
Рыжов Николай Александрович
Сазонов Юрий Александрович
Комраков Георгий Петрович

Препринт № 543

Экспериментальные исследования
вариаций СДВ сигнала, связанных с искусственными
возмущениями ионосферы,
создаваемыми нагревным стендом СУРА

Подписано в печать 30.11.11. Формат 60x84/16
Бумага писчая. Объем 0,7 усл.п.л.
Тираж 50. Заказ 5609

В.О.Рапопорт
С.В.Поляков
Ю.В.Шлюгаев
Н.А.Рыжов
Ю.А.Сазонов
Г.П.Комраков

Отпечатано в ФГБНУ НИРФИ.
603950 Н.Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а

Нижний Новгород

2011

10. Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., Komrakov G.P., Ryzhov N.A., Markov G.A., Belov A.S., Parrot M., Rauch J.-L. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility // J. Geophys. Res., 2010, v.115, No.A10, p.322.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ
СДВ СИГНАЛА, СВЯЗАННЫХ С ИСКУССТВЕННЫМИ
ВОЗМУЩЕНИЯМИ ИОНОСФЕРЫ, СОЗДАВАЕМЫМИ
НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ СУРА / В.О.Рапопорт, С.В.Поляков,
Ю.В.Шлюгаев, Н.А.Рыжов, Ю.А.Сазонов, Г.П.Комраков // Препринт
№543. – Нижний Новгород: ФГБНУ НИРФИ, 2011. – 16 с.

В препринте представлены результаты экспериментальных исследований ионосферы с помощью нагревного стенда СУРА. Апробирована новая методика исследования влияния ионосферных неоднородностей на параметры СДВ сигнала. Предложена модель области распространения сигнала, проведены расчеты параметров ионосферы.

Литература

1. Inan U.S., Walt M., Voss H., Imhof W. Energy Spectra and Pitch Angle Distributions of Lightning-Induced Electron Precipitation. Analysis of an Event Observed on the S81-1(SEEPP) Satellite // J. Geophys. Res., 1989, v.94, No.A2, p.1379.
2. Inan U.S., Shafer D.S., Yip W.Y., Orville R.E. Subionospheric VLF signatures of nighttime D-region perturbations to the vicinity of lightning discharges // J. Geophys. Res., 1988, v.93, No.A10, p.11455.
3. Inan U.S., Rodriguez J.V., Idone V.P. VLF signatures of lightning-induced heating and ionization to nighttime D-region // Geophys. Res. Lett., 1993, v.20, No.21, p.2355.
4. Sampath H., Inan U., Johnson M. Recovery signatures and occurrence properties of lightning-associated subionospheric VLF perturbations // J. Geophys. Res., 2000, v.105, No.A1, p.183.
5. Inan U.S., Sampson W.A., Taranenkov Y.N. Space-time structure of optical flashes and ionization changes produced by lightning-EMP // Geophys. Res. Lett., 1996, v.23, No.2, p.133.
6. Inan U.S., Pasko V.P., Bell T.F. Sustained heating of the ionosphere above thunderstorms as evidenced in "early/fast" VLF events // Geophys. Res. Lett., 1996, v.23, No.10, p.1067.
7. Inan U.S., Golkowski M., Casey M.K., Moore R.C., Peter W., Kulkarni P., Kossey P., Kennedy E., Meth S., Smit P. Subionospheric VLF observations of transmitter-induced precipitation of inner radiation belt electrons // Geophys. Res. Lett., 2007, v.34, p.L02106.
8. Cohen M.B., Inan U.S., Golkowski M., Lehtinen N.G. On the generation of ELF/VLF waves for long distance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere // J. Geophys. Res., 2010, v.115, No.A07, p.322.
9. Jin G., Spasojevic M., Cohen B., Inan U.S., Lehtinen N.G. The relationship between geophysical conditions and ELF amplitude in modulated heating experiments at HAARP: Modeling and experimental results // J. Geophys. Res., 2011, v.116, No.A07, p.310.

В настоящее время наблюдается тенденция перехода от активных экспериментов, связанных с коротковолновым (КВ) нагревом ионосферы, к активным экспериментам в магнитосфере. В первую очередь проводятся исследования высыпания энергичных частиц радиационных поясов в ионосферу, связанные с резонансным взаимодействием радиоволн и энергичных частиц радиационных поясов. Такое взаимодействие происходит в том случае, когда скорости частиц совпадают с фазовой скоростью волны. В экспериментах может быть реализовано эффективное взаимодействие высокоэнергичных электронов с радиоволнами сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона (свисты) или высокоэнергичных протонов с волнами СНЧ диапазона (альвеновские волны). Активные эксперименты по исследованию воздействия мощными сигналами СДВ диапазона на радиационные пояса и связанного с ним высыпания высокоэнергичных частиц проводятся с середины 90-х годов. Эксперименты по регистрации энергичных частиц с помощью ИСЗ показали, что высыпание частиц связано с работой СДВ передатчика. Так, в [1] наблюдается четкая зависимость интенсивности высыпания частиц от работы СДВ в режиме меандра (5 с – *on*, 5 с – *off*) передатчика. На рис. 1 работа СДВ передатчика представлена на верхней панели.

Очевидно, что поток энергичных частиц будет расти с ростом интенсивности СДВ излучения, достигающего радиационных поясов. Интенсивность этого излучения определяется как мощностью СДВ передатчика, так и условиями прохождения волн через ионосферу – магнитосферу. Существенную роль в процессе захвата и распространения волн СДВ диапазона могут играть искусственные возмущения ионосферы при воздействии на нее мощными пучками радиоволн различных диапазонов частот.

В 90-е годы в США была проведена серия экспериментов по изучению влияния искусственного возмущения ионосферы на высыпание частиц. Для определения связи искусственных

ионосферных возмущений с высыпанием частиц была разработана довольно остроумная методика, суть которой сводится к следующему. При воздействии на D-слой ионосферы мощными радиосигналами (это могут быть молнии, сигналы СДВ передатчиков) могут наблюдаться возмущения, связанные а) с непосредственным нагревом D-слоя, либо б) с высыпанием энергичных частиц под воздействием мощного сигнала на радиационный пояс.

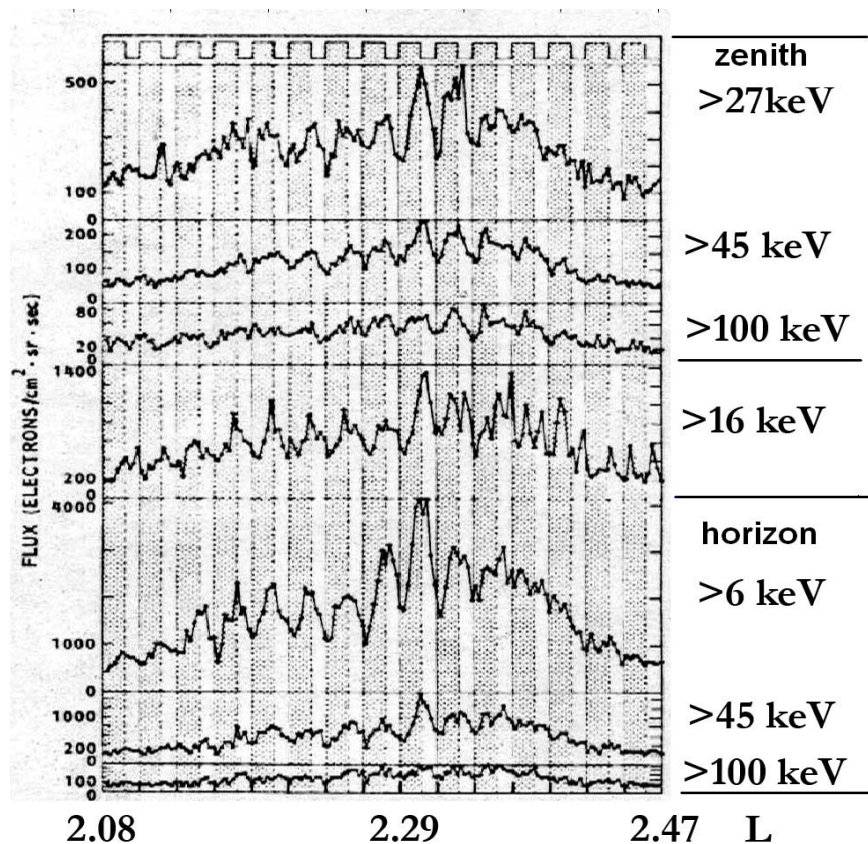


Рис. 1

В первом случае процесс является безынерционным, т.е. возмущения должны наблюдаться сразу после воздействия, во

Сравнение разброса фаз для случаев *SURA on* и *SURA off* приведено на рис. 9, где на левой панели построены гистограммы для возмущенной ионосферы, на правой – для невозмущенной. Разница в разбросе фазовых сдвигов достаточно велика.

Выводы

- Предложена и апробирована новая методика исследования влияния ионосферных неоднородностей на параметры СДВ сигнала.
- Экспериментальные данные соответствуют расчетным оценкам параметров ионосферы.

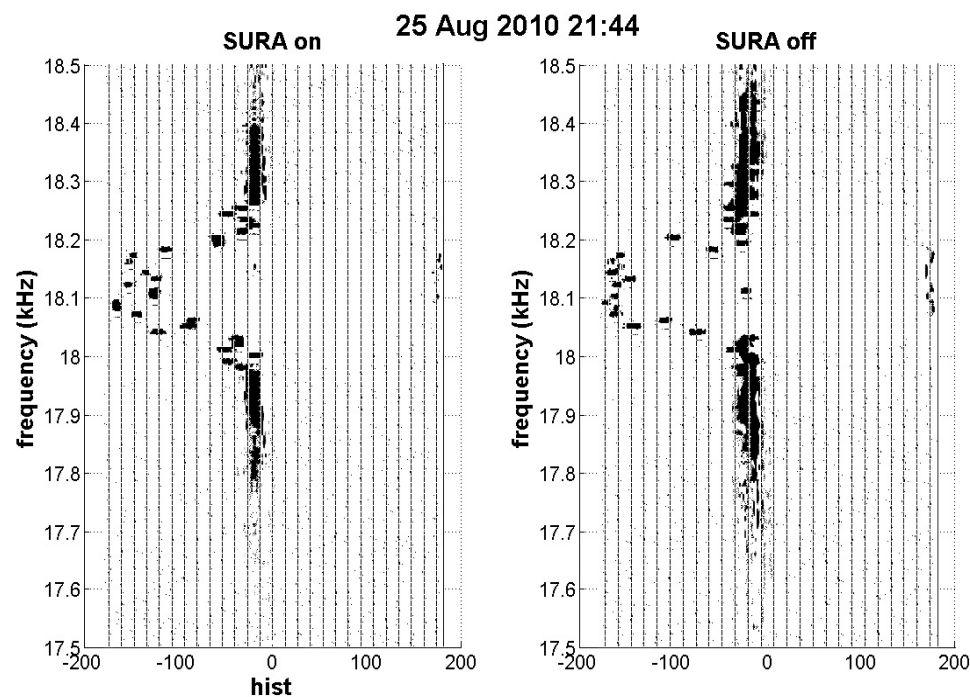


Рис. 9

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №09-05-00780

В нашем случае на спектрограмме выбирался интервал частот 17,5–18,5 кГц, спектральное разрешение 10 Гц, временное разрешение 0,1 с. Мощный СДВ передатчик излучал на центральной частоте 18,1 кГц в полосе 300 Гц. На верхней панели приведена спектрограмма принимаемого сигнала, на нижней – временная зависимость мощности передатчиков СУРЫ. Весь временной интервал работы СДВ передатчика разбивался на участки *SURA on* (СУРА включена), *SURA off* (СУРА выключена). Для каждой реализации спектра измерялся фазовый сдвиг между ортогональными антеннами, затем вычислялась гистограмма отдельно для сдвигов фаз при включенных и выключенных передатчиках СУРЫ.

На рис.8 приведены гистограммы регистрируемого сигнала для частот в полосе от 17,5 до 18,5 кГц, передатчики СУРЫ выключены. Каждая гистограмма характеризует сдвиг фаз между сигналами с двух ортогональных антенн в пределах $\pm 180^\circ$ и получена для значений сигнала в полосе 10 Гц. Ожидаемый эффект должен заключаться в увеличении разброса сдвигов фаз во время нагрева ионосферы по сравнению с разбросом фаз, когда нагрев отсутствует.

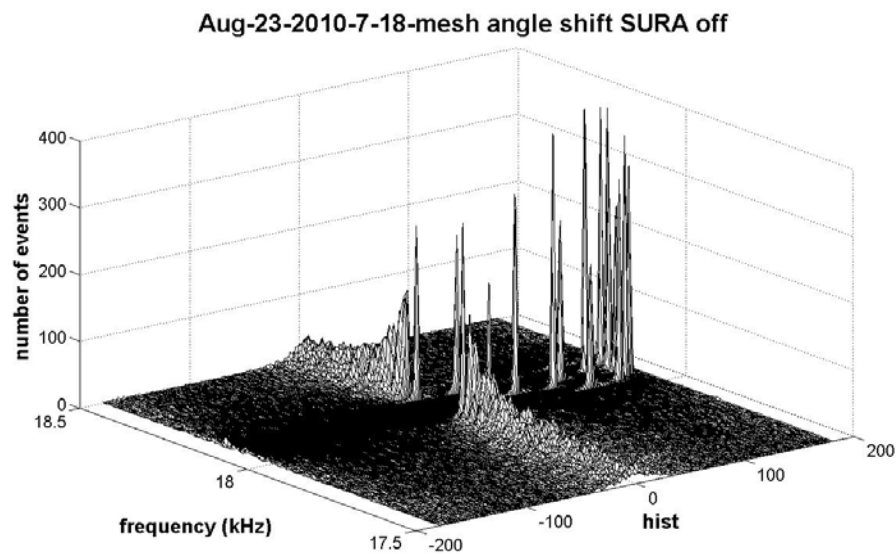


Рис. 8
12

втором – должна быть задержка, связанная с распространением СДВ волн до поясов и зависящая от времени прохождения энергичных частиц из области поясов до ионосферы.

Эксперимент проводился таким образом. Регистрировался сигнал на трассе с расстоянием между СДВ передатчиком (диагностическим передатчиком) и приемником порядка 1000 км. Возмущения ионосферы производились либо вторым (нагревным) СДВ передатчиком, расположенным в середине трассы, либо молниями грозы, которая находилась также в середине трассы. Измерялись вариации СДВ сигнала. Возмущения, связанные с излучением молний [2-6], можно было четко разделить на два класса – безынерционные и с запаздыванием примерно на одну секунду. Время запаздывания соответствовало времени распространения СДВ сигнала до радиационных поясов плюс время прохождения энергичных электронов до ионосферы. Эксперименты с той же геометрией проводились также с использованием второго (нагревного) СДВ передатчика для создания возмущений в ионосфере [7]. В последнем случае обработка проводилась методом наложения эпох. Эксперименты привели к выводу, что при работе с СДВ передатчиком, скорее всего, наблюдается лишь обычный безынерционный нагрев. Это означает, что при возмущении ионосферы молниями и СДВ передатчиками работают различные механизмы воздействия. Если при СДВ нагреве возмущения происходят лишь в D-слое ионосферы, то о характере воздействия на ионосферу молний известно мало, но, скорее всего, молнии занимают большую область высот. Прояснить ситуацию можно было бы, проводя эксперименты с нагревными КВ стендами. В этом случае мы располагали бы большей информацией о модификации ионосферы в широком диапазоне высот.

Другим направлением исследований могли быть исследования структуры полей с помощью искусственных спутников Земли (ИСЗ), где можно было бы измерить пространственную структуру поля [8, 9].

Рассмотрим подробнее процессы в возмущенной ионосфере, приводящие к лучшему отбору мощности СДВ сигнала из волновода Земля-ионосфера в верхнюю ионосферу – магнитосферу.

Нагрев ионосферы может приводить:

– к образованию в нижней ионосфере плоских горизонтальных неоднородностей. Эти неоднородности могут существенно улучшать согласование вакуумного зазора Земля – ионосфера с ионосферой,

– к генерации вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных неоднородностей.

В настоящей работе приведены результаты исследований особенностей распространения СДВ волн в возмущенной ионосфере. Для проведения наземных измерений возникла необходимость в разработке новых методик эксперимента, которые будут приведены ниже.

1. Измерения с помощью ИСЗ DEMETER (эксперимент СУРА – DEMETER) [10]

При нагреве ионосферы мощным КВ излучением генерируются вытянутые вдоль геомагнитного поля неоднородности электронной концентрации с поперечными масштабами от десятков и сотен метров до 50 – 100 км. Рассеяние СДВ волн на ионосферных неоднородностях приводит к расширению пространственного спектра электромагнитных волн. Так, в измерениях поля с помощью ИСЗ DEMETER ширина пространственного спектра СДВ передатчика над нагревным стендом составляла $\Delta k \approx \pm 0,2 \text{ м}^{-1}$. Увеличение спектральной плотности в этой полосе составляло величину, достигающую (в центре континуума) до 30 дБ. На расстояниях до 60 км от центра области КВ нагрева интенсивность несущей практически не отличалась от континуума (рис. 2).

Взаимодействие волн свистовой и электростатической мод приводит к заполнению "провала" на дисперсионной кривой (зависимости k_p от k_{\perp}). Показатель степени пространственного спектра СДВ волн имеет плоский участок (свистовая мода и начало электростатической), и участок со спектральным индексом $-2,6$ (коротковолновая часть электростатической моды). Вне "провала" сигнал практически отсутствует (рис. 3).

Земля – вакуумный зазор – однородная гиротропная ионосфера с вертикальным магнитным полем. В расчетах использовались следующие значения параметров модели: высота волновода Земля–ионосфера – 100 км, расстояние от области нагрева до передатчика порядка 1000 км, относительная концентрация неоднородностей $\Delta N / N \sim 10^{-3}$. Плазменная частота электронов варьировалась в пределах 10 – 1000 кГц, размер неоднородностей выбирался из условия оптимального рассеяния волны данной моды вниз, частота передатчика – 20 кГц. Рассеянный сигнал определялся методом возмущений. Эта довольно грубая модель представлялась адекватной для проведения оценок. Ожидаемый эффект должен быть связан с изменением поляризации принимаемого сигнала. Из оценок следовало, что при наличии неоднородностей сдвиг фаз между сигналами с двух антенн должен меняться \sim на 2° .

Обработка сигнала:

На спектрограмме регистрируемого широкополосного сигнала (Рис. 7) выбиралась область частот, примыкающая к частоте передатчика.

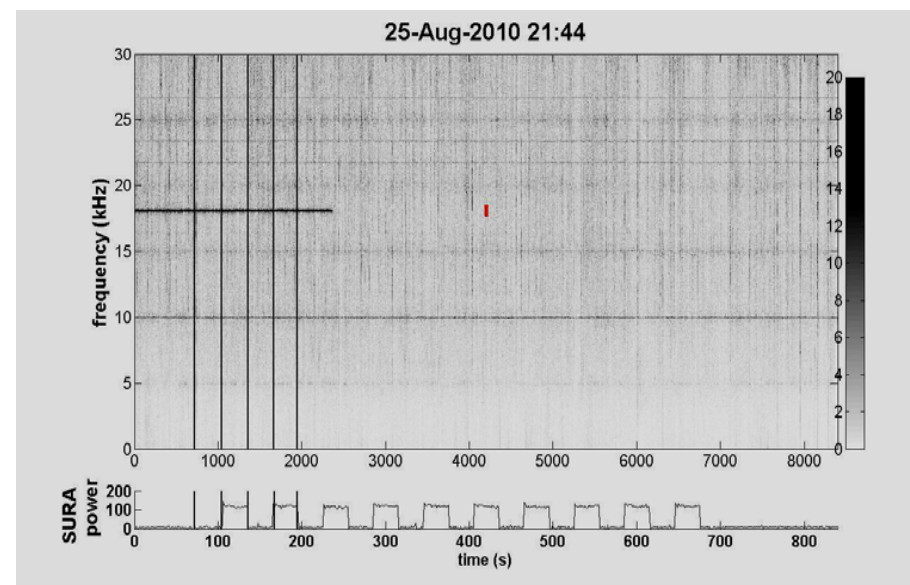


Рис. 7

Сравнение величины эффекта при включенном и выключенном нагревом стенде иллюстрирует рис. 6.

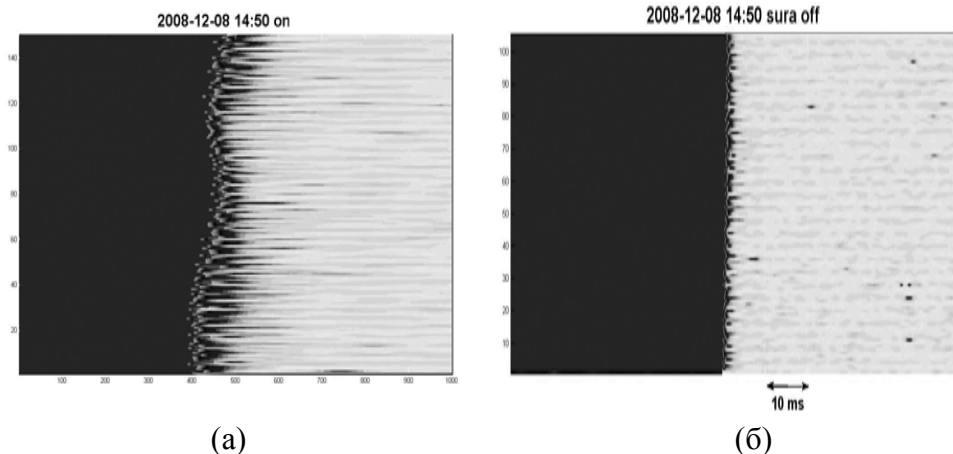


Рис. 6

3. Взаимодействие возмущенной ионосферы с СДВ сигналами удаленных СДВ передатчиков

В этом случае есть возможность регистрировать СДВ сигнал, рассеянный ионосферными неоднородностями с поперечными размерами порядка длины волны. Действительно, рассеянная волна, которую можно зарегистрировать, должна распространяться вертикально вниз, т.е. для этой волны должно выполняться условие $k_{\perp}^s \approx 0$. Тогда для выполнения условий синхронизма $k_{\perp}^s = k_{\perp}^t + k_{\perp}^{irreg}$ необходимо выполнение равенства $k_{\perp}^t \approx -k_{\perp}^{irreg}$. Здесь k_{\perp}^t, k_{\perp}^s – поперечные по отношению к вертикали волновые числа падающей и рассеянной волн, k_{\perp}^{irreg} – поперечное волновое число ионосферных неоднородностей. Заметим, что для удаленного передатчика могут распространяться лишь волны на фиксированных значениях k_{\perp}^t , соответствующих собственным модам волновода Земля–ионосфера. Для оценки ожидаемого эффекта были проведены модельные расчеты по собственной разработанной программе. Модель волновода Земля–ионосфера, которая использовалась в расчетах, представляла собой слоистую среду распространения: идеальная

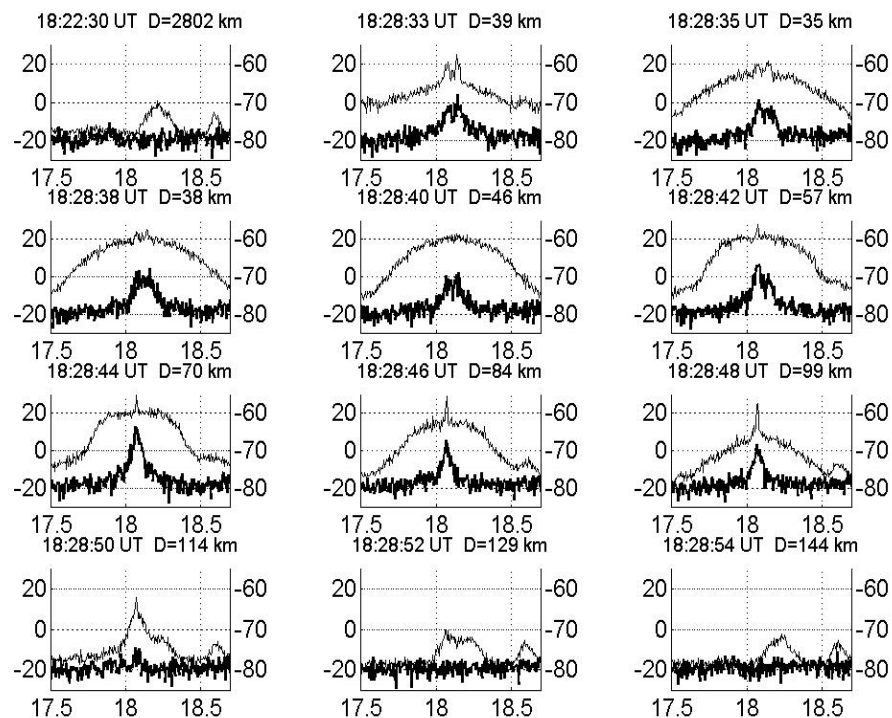


Рис.2

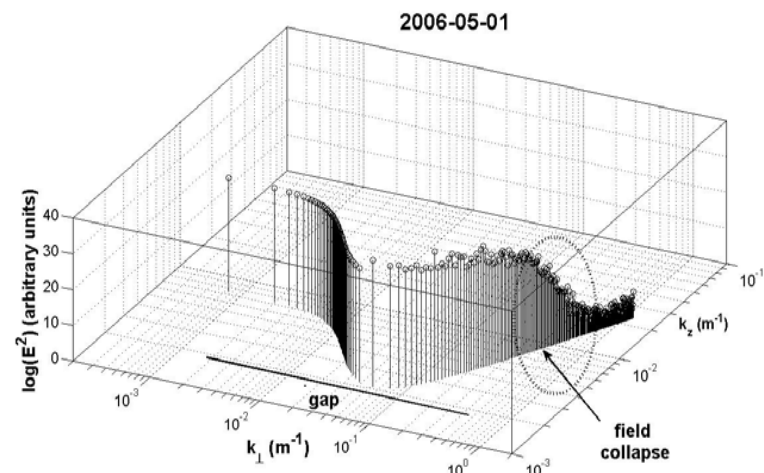


Рис.3

2. Эксперимент СУРА – ГОЛИАФ

Цель эксперимента – исследование стратифицированных возмущений неоднородной ионосферы. В результате нагрева должен наблюдаться отраженный от ионосферы сигнал.

В эксперименте СУРА – ГОЛИАФ используется то уникальное обстоятельство, что нагревный стенд и СДВ передатчик находятся практически в одной точке.

Это обстоятельство позволяет регистрировать частичные отражения СДВ сигнала от нижней ионосферы. В эксперименте СДВ передатчик работал в импульсном режиме. Если стратифицированные неоднородности приводят к частичному отражению волн от нижней ионосферы, то на заднем фронте импульса должен появляться дополнительный сигнал длительностью порядка одной миллисекунды. Прием сигнала проводился на две скрещенные рамочные антенны. В эксперименте в качестве нагревной установки был использован стенд СУРА (Васильсурск, Нижегородская область), мощным СДВ передатчиком служил СДВ передатчик ГОЛИАФ, расположенный вблизи Нижнего Новгорода. Приемный пункт был расположен в 17 км от нагревного стенда в поселке Новая Жизнь. Эксперимент проводился в период с 8 по 10 декабря 2008 г. Стенд СУРА работал в следующем режиме: 15 минут включен, 15 минут выключен. СДВ передатчик работал на частоте 17,5 кГц в импульсном режиме с периодом посылки импульсов равным 4 с. Длительность импульса была равна 0,3 и 1 сек. При обработке сигнал предварительно фильтровался в полосе $\Delta f \sim 1 \text{ kHz}$ (для обработки использовали импульсный фильтр (фильтр *fir1* системы Matlab)), после чего использовалось преобразование Гильберта, позволяющее получить сигнал в виде $\Phi = Ae^{i\omega t}$. В произведении сигнала на комплексно-сопряженную величину $\Phi \cdot \Phi^*$ осцилляции практически отсутствовали. Амплитуда сигнала при этом характеризовала форму импульса с временным разрешением порядка 1 мс. Временное разрешение определялось полосой фильтра, через который предварительно пропусклся сигнал. Пример записи сигнала приведен на рис. 4, где по оси абсцисс отложена временная развертка одного периода, по оси ординат – номер скана.

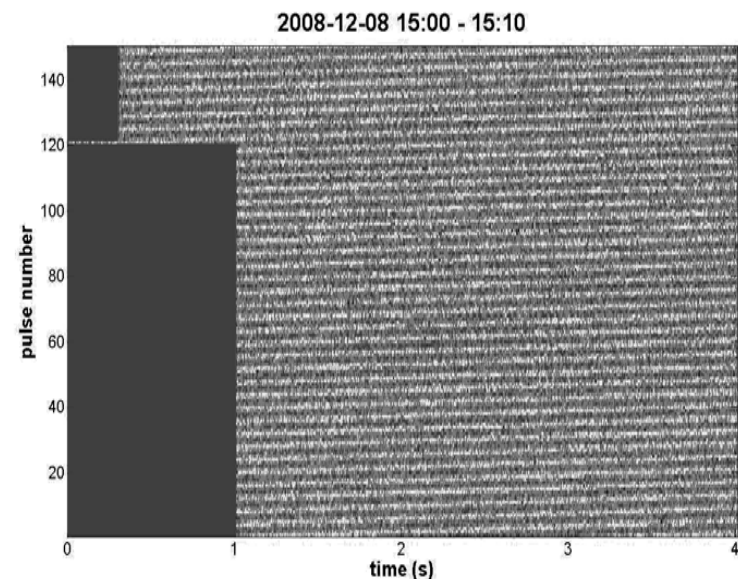


Рис.4

С первого по 120 скан длительность импульса равна одной секунде, со 121 по 145 – 0,3 с.

На рис. 5 изображен задний фронт импульса. После окончания импульса отчетливо видна ступенька длительностью порядка 1 мс, связанная с отраженным от ионосферы сигналом.

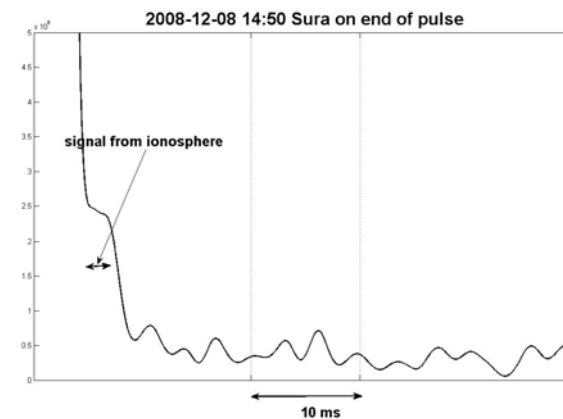


Рис. 5